



במחקר שנערך על כנות צמחים מורכבים ממשפחת הדלועיים, נמצאו צמחים עמידים לריכוז גבוה של קרבמזפין במי השקיה מבחינת גידול והתפתחות | צילום: מנחם אדלשטיין

מניעת חדירה של קרבמזפין (חומר רפואי) לשרשרת המזון על-ידי שימוש בזני דלעת המשמשים ככנות בצמחים מורכבים

29 ביוני, 2015

גיליון קיץ 2015 / כרך 6(2)

חזית המחקר

על קצה המזלג

- חומרים רפואיים (כגון אנטיביוטיקה) אינם מפורקים בצורה מלאה במכוני הטיפול בשפכים, וריכוזים משמעותיים שלהם נמצאו במי תהום.
- קיים חשש לחדירה של חומרים עמידים אלה לשרשרת המזון עקב עליית ריכוזם בקרקעות חקלאיות שמושקות במי קולחים ומטופלות בבוצת קולחים.
- קליטת החומרים הרפואיים על-ידי שורשי צמחים תלויה בבררנות של הצמח לחומר המסוים.
- ניתן לשלוט ברמת מעבר חומרים שונים לירקות עצמם על-ידי שימוש בירקות שמורכבים מחיבור של כנה ורוכב, דהיינו מערכת שורשים מצמח אחד ונצר של צמח אחר.
- נמצא כי כנות מסוימות מסוגלות למנוע העברת קרבמזפין (חומר רפואי העמיד לפירוק על-ידי חיידקים) מהשורשים לנצר. לפיכך, להרכבת צמחים יש פוטנציאל ליצור מחסום ביולוגי לחדירת קרבמזפין לנוף הצמחים בכלל ולירקות בפרט.
- טרם נבדק אם צמח מורכב אכן שומר על התכונות שנמצאו עבור הכנה במחקר זה.

המערכת

מני-בן-חור

המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מנהל החקלאי – מרכז וולקני

מנחם אדלשטיין

מרכז מחקר נווה, מנהל המחקר החקלאי – מרכז וולקני

ג'ו יונג יון

מרכז מחקר נווה, מנהל המחקר החקלאי – מרכז וולקני

נירית ברנשטיין

המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי – מרכז וולקני

חיים טנאו

המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי – מרכז וולקני

אחמד נאסר

המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי – מרכז וולקני

פביאן באומקולר

מרכז מחקר נווה, מנהל המחקר החקלאי – מרכז וולקני

זאב גרסטל

המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי – מרכז וולקני

מאמר זה עבר שיפוט עמיתים

ציטוט מומלץ

בן-חור מ, אדלשטיין מ, יונג ג' ואחרים. 2015. מניעת חדירה של קרבמזפין (חומר רפואי) לשרשרת המזון על-ידי שימוש בזני דלעת המשמשים ככנות בצמחים מורכבים. *אקולוגיה וסביבה* 6(2).

תקציר

לאחרונה קיים חשש לחדירת חומרים רפואיים לשרשרת המזון עקב עלייה בריכוזם בקרקע ובמקורות המים. ייתכן שניתן להקטין את חדירת החומרים הרפואיים לצמח ואת הצטברותם בחלקים האכילים על-ידי שימוש בצמחי ירקות מורכבים עם כנות מתאימות. מטרת המחקר הייתה לבחון את מידת הקליטה והתנועה של קרבמזפין, שהוא חומר רפואי יציב, בזני דלעת שונים המשמשים ככנות בייצור שתילים מורכבים של צמחים ממשפחת הדלוועיים, ואת עמידות הזנים כנגד ריכוזים גבוהים של חומר זה. שבעה זנים אלה נשתלו בחממה בדליים שהכילו פרלייט, שתיל בכל דלי, והושקו בטפטוף במים שהכילו 10 או 500 מיקרוגרם (מק"ג) קרבמזפין לליטר. הניסוי נמשך שלושים יום בארבע חזרות באקראיות גמורה. ערכי ההגבה, המוליכות החשמלית וריכוז הקרבמזפין במי ההשקיה והנקז נמדדו במועדים שונים. לקראת סוף הגידול נמדד ריכוז הקרבמזפין גם במהול העצה. בסוף הגידול נמדד המשקל היבש של השורש ושל החלקים העל-קרקעיים של הצמח (הנוף) בכל צמח. בכל הזנים ובשני ריכוזי הקרבמזפין שנבחנו לא נמצאה פגיעה מובהקת בהתפתחות הצמח. עלייה בריכוז הקרבמזפין במי ההשקיה לוותה בעלייה בריכוזו במהול העצה, כלומר בהולכתו לנוף. זוהו הבדלים בין הזנים בתנועת הקרבמזפין לנוף; בהשקיה עם 10 או 500 מק"ג קרבמזפין לליטר נמצאו זנים שהתאפיינו בתנועת קרבמזפין מופחתת לנוף בהשוואה לחדירה ולתנועה בלתי בִּרְכָּנִית שלו בצמח. מכאן, שזנים אלה יכולים לשמש באופן פוטנציאלי חסמים ביולוגיים למניעת חדירה של קרבמזפין לחלק האכיל של צמחים ממשפחת הדלוועיים

מבוא

השימוש ההולך והגובר לאחרונה בחומרים רפואיים (תרופות) בארץ ובעולם גורם לעלייה בתפוצתם בסביבה, כולל בשטחים חקלאיים [5,15]. חדירת חומרים אלה לשרשרת המזון יכולה להיגרם מקליטתם על-ידי צמחים המשמשים למאכל אדם או להאבסת בעלי חיים, או מהגעתם למקורות מים המיועדים לשתייה. החומרים הרפואיים מופרשים על-ידי האדם ובעלי החיים או מושלכים ישירות למערכת הביוב, וכך מוצאים את דרכם למי השפכים במכוני הטיפול (מט"שים), ולבוצות שפכים ולפרש בעלי חיים (המשמשים לדישון שטחים חקלאיים). מכאן, שהשקיה בקולחים, שהם מקור מים משמעותי להשקיה בארץ, ושימוש בפרש בעלי חיים ובבוצות שפכים בשדות חקלאיים הם מקור פוטנציאלי לזיהום הקרקע בחומרים רפואיים ולקליטתם על-ידי הגידולים.

ההרחקה של חומרים רפואיים במט"שים חלקית בלבד, ותלויה בתכונות החומר, בעמידותו לפירוק ובסוג הטיפול במים [8,14]. תוצאות דומות נמצאו בבוצות שפכים בעבודתם של גרסטל ואחרים [3]. לדוגמה, אחוזי ההרחקה במט"שים עבור קרבמזפין (carbamazepine), דיקלופנאק (diclofenac, מוכר כוולטרן), בִּזְפִּיבְּרַט (bezafibrate) וחומצה אצטילסליצילית (acetylsalicylic acid, מוכר כאספירין) דווחו כ-10%, 8%, 26%, 51% ו-81% בהתאמה [14,20]. סולפונאמידים, שהם תרכובות אנטיביוטיות המשמשות בעיקר לטיפולם וטרינריים [6], נמצאו בריכוזים משמעותיים במי תהום מתחת לברכות החלחול של השפד"ן [13] ובסמיכות לשדות חקלאיים בגליל ים המושקים בקולחים מאז שנות ה-60 [5].

קליטת מומסים מתמיסת הקרקע על-ידי השורש יכולה להיעשות באופן פעיל או סביל דרך נשאים ותעלות בממברנה בעלי בִּרְכָּנוֹת שונה למומסים שונים, או דרך ממברנה שאינה יוצרת מחסום כימי או פיזיקלי למומס. במקרה של קליטה סבילה, ריכוז המומסים בצמח יהיה תלוי בעיקר בריכוזם בתמיסת הקרקע ובקצב הדיות, שהוא הכוח המניע העיקרי לתנועתם בצמח. לדוגמה, במחקר שנערך בגידול מלפפון מזן סאפי במערכת הידרופונית, שתמיסת המזון בה הכילה ריכוזים שונים של קרבמזפין, נמצא שריכוזי הקרבמזפין במהול העצה של צמח המלפפון ובתמיסת המזון היו דומים: 65.9 ו-76.1 מיקרוגרם (מק"ג) לליטר, בהתאמה [18]. דבר זה מרמז על קליטה סבילה של קרבמזפין על-ידי צמחי מלפפון. לעומת זאת, ישנם צמחים אחרים, שקליטת המומסים בהם על-ידי מערכת השורשים נעשית באופן בִּרְכָּנִי, ולכן קליטתם תהיה מובדלת בצמחים שונים. ניתן להשתמש בקליטה סבילה זו של השורשים ככלי למניעת חדירה של מזהמים לצמח והצטברותם בחלקים האכילים, וזאת על-ידי שימוש בצמחי ירקות מורכבים [10,11,12].

צמח מורכב נוצר מחיבור **כנה** (מערכת שורשים מצמח אחד) עם רוכב (נצר של צמח אחר) הגדלים כצמח אחד [10]. השימוש בצמחים מורכבים נועד בעיקר להתמודדות עם מחלות המועברות בקרקע ופוגעות בשורשי הצמח [9]. הרכבת צמחים שכזו נעשה פרי, ולאחרונה נעשה גם השימוש בצמחי ירקות מורכבים נפוץ בארץ ובעולם. לדוגמה, ביפן ובקוריאה יחד השתמשו בשנת 2000 בכ-700 מיליון שתילי ירקות מורכבים, ובארץ משתמשים כיום בכ-7 מיליון שתילי ירקות מורכבים בשנה [10]. Edelstein and Ben-Hur בחנו את השימוש בצמחי מלון מורכבים למניעת חדירה של מזהמים אי-אורגניים לצמח, כגון מתכות כבדות, בורון ויוני מליחות. אדלשטיין

ואחרים^[1] מצאו שבפרות של צמחי מלון מורכבים על כנת דלעת TZ-148 שהושקו בשדה במי קולחים, ריכוז היסודות בורון, אבץ, סטרונציום, מנגן, נחושת, טיטניום, כרום, ניקל וקדמיום, היה נמוך מאשר בצמחים לא-מורכבים, ועבור מרבית היסודות ההבדלים היו מובהקים. Edelman ואחרים^[2] בחנו את השפעתם של צירופים שונים של הרכבות בצמחי דלעת ומלון על קליטה בשרש ותנועה לנוף של יוני כלוריד ונתרן. בעבודה זו נמצא שכנת דלעת TZ-148 ומלון מזן ערבה לא מנעו קליטה ותנועה של יוני כלוריד. לעומת זאת, כנת הדלעת הקטינה את תכולת הנתרן בנוף צמחי המלון המורכבים לערכים של פחות מ-60 מילימול לק"ג בהשוואה לערכים של מעל 400 מילימול לק"ג שנמצאו בנוף צמחי המלון הלא-מורכבים והמורכבים על כנת המלון. ירידה זו בתכולת הנתרן בנוף הצמחים שהורכבו על כנת הדלעת נבעה מעיכוב בקליטה של 74% מהנתרן שהיה זמין בתמיסת בית השורשים, ומהצטברות של 46.9% מכלל הנתרן שנקלט על-ידי הצמח ברקמת השורש.

קרבתמזפין הוא חומר פעיל בתרופות אנטי-אפילפטיות ובתרופות הניתנות לטיפול בהפרעה דו-קוטבית^[16]. צריכתו השנתית על-ידי האוכלוסייה^[23] והימצאותו במקורות מים עיליים, לרבות מי שתייה, גבוהות^[17, 21]. לדוגמה, מעוז ואחרים^[4] מצאו ריכוזי קרבמזפין ממוצעים של 0.66 ו-0.52 מק"ג לליטר במי קולחים שנדגמו במט"שים ברעננה, בשפד"ן ובערד, בהתאמה. גרסטל ואחרים^[3] מצאו ריכוזי קרבמזפין בין 0 ל-800 מק"ג לק"ג בבוצות שפכים שנדגמו מ-34 אתרים שונים ברחבי הארץ, וב-26 מתוכם הריכוזים היו מעל 100 מק"ג לק"ג. גרוסברגר ואחרים^[2] בחנו בניסויי הדגרה מבוקרים את קצבי הפירוק המיקרוביאלי של החומרים הרפואיים בזפיברט, דיקלופנ'ק, קרבמזפין, גמפיברוזיל (gemfibrozil), איבופרופן (ibuprofen, מוכר כאדוויל) ונפרוקסן (naproxen) בקרקעות לס. נמצא שקרבמזפין הוא חומר יציב כנגד פירוק מיקרוביאלי, ושזמן מחצית החיים שלו הוא למעלה משנה, בעוד זה של שאר החומרים שנבחנו נמוך מ-70 יום.

מטרת המחקר הייתה לבחון את מידת הקליטה והתנועה של קרבמזפין בזני דלעת שונים ואת עמידותם לריכוזים גבוהים שלו. זאת, כדי לבחון את האפשרות להשתמש בכנות מתאימות כנגד חדירות קרבמזפין לצמחים ממשפחת הדלוועיים. המחקר הנוכחי מתמקד בקרבמזפין עקב היותו חומר רפואי יציב שתפוצתו במט"שים רבה.

חומרים ושיטות

המחקר נערך בחממה במרכז מחקר נווה יער של מכון וולקני, ונבחנו בו שבעה זנים שונים של צמחי דלעת (TZ-148, LUM, BCPF, SM8, PI369346 [PI], RUS2, CUZCO) מורכבים של צמחים ממשפחת הדלוועיים, כגון מלון, אבטיח, קישוא ומלפפון (להלן – טיפולי צמחים). שתילי הזנים נשתלו ב-10.5.2014 בדליים בנפח של 10 ליטר שהכילו פרלייט מס' 2 (אגריקל, הבונים), שתיל אחד בכל דלי, והושקו בטפטוף. בחמשת הימים הראשונים של הגידול הושקו כל הצמחים במים שפירים כדי לאפשר התבססות, ולאחר מכן הושקו במים שפירים שהוסף להם קרבמזפין (מחברת סיגמא) לקבלת ריכוזים של 10 ו-500 מק"ג לליטר (להלן – טיפולי השקיה). כל זן נבחן בשני טיפולי השקיה, בארבע חזרות ובאקראיות גמורה. כל העציצים דושנו באופן אחיד על-ידי תוספת של 2 סמ"ק דשן שפר 3 (יחס משקלי של 1:4:5.8, N:P:K, בהתאמה) לליטר מי השקיה.

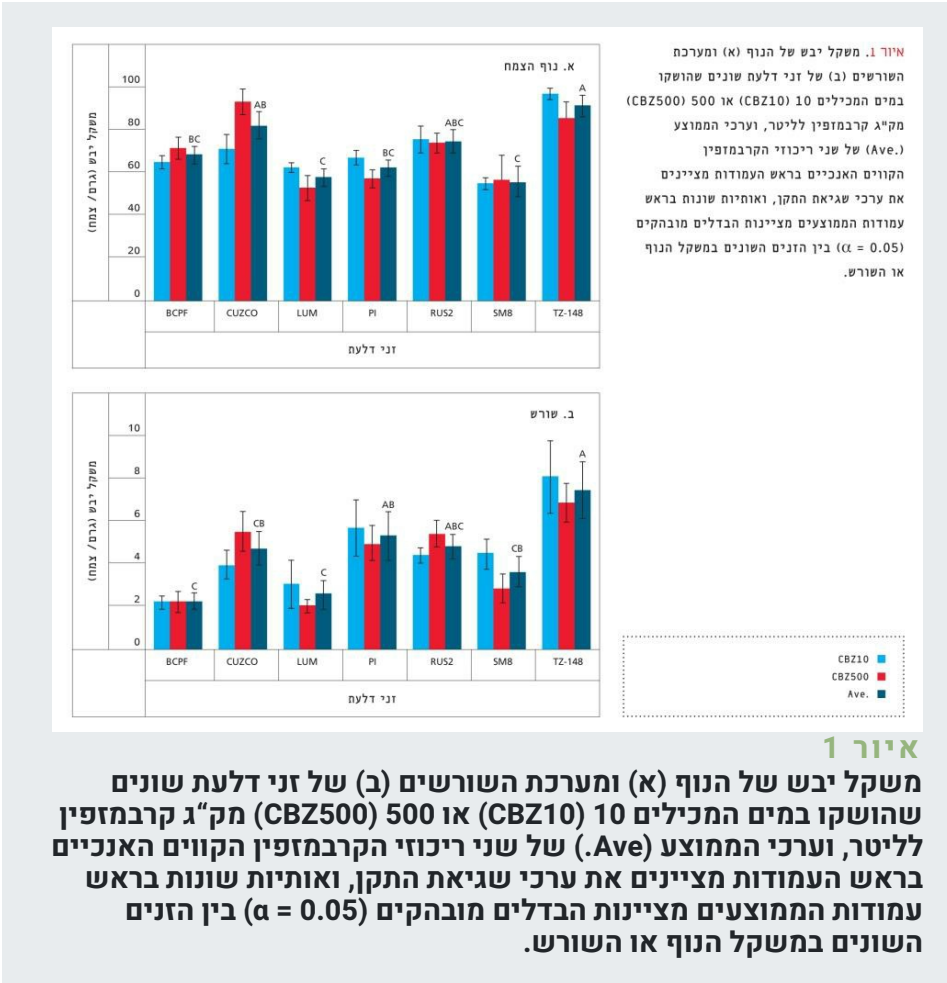
הצמחים גודלו למשך 30 יום ממועד שתילתם, ובמהלך כל תקופת הגידול הושקו חמש פעמים ביום במנת השקיה שגדולה מהצריכה המשוערת של הצמח, כדי לאפשר שטיפה של מצע הגידול ולמנוע הצטברות של מלח וקרבמזפין באזור בית השורשים בעציץ. מי הנקז נאספו מכל עציץ ארבע פעמים במהלך הגידול, ונקבעו ערכי ההגבה (pH) והמוליכות החשמלית (EC) בהם. בדגימות מי הנקז שנלקחו ב-22.5.2014 (השלב התחילי של הגידול) וב-8.6.2014 (השלב הבוגר של הצמח) נמדד גם ריכוז הקרבמזפין. גובה הצמחים בכל עציץ נמדד בשלושה מועדים שונים במהלך הגידול.

בסוף הגידול ומיד לאחר ההשקיה האחרונה נחתך גבעול הצמח בכל עציץ כ-5 ס"מ מעל פני מצע הגידול, ונוף הצמח (גבעול עם העלים) יובש בתנור ב-60 מעלות צלזיוס למשך 48 שעות לצורך קביעת משקלם היבש. מיד לאחר חיתוך הגבעול הורכבה צינורית בקצה כל גבעול. מוהל העצה (xylem sap exudate) נאסף בה, וריכוז הקרבמזפין בו נקבע. מכיוון שאיסוף מוהל העצה נעשה מיד לאחר חיתוך הגבעול, ניתן להניח שאיכות מוהל העצה לפני חיתוך הגבעול ואחריו הייתה דומה. לאחר איסוף מוהל העצה הופרדו שורשי הצמח בכל עציץ ממצע הגידול, יובשו בתנור ב-60 מעלות למשך 48 שעות ומשקלם היבש נמדד. דגימות מי הנקז ומוהל העצה הועברו למעבדה בתא מקורר, וריכוז הקרבמזפין נקבע על-ידי מכשיר Sciex 3200 (AB MDC) (Q TRAP LC/MS/MS).

תוצאות ודיון

יכולת של זנים לשמש ככנות בצמחים מורכבים ולמנוע חדירת מזהמים לחלק האכיל של הצמח תלויה בברכנות של הכנות בקליטת מזהמים ובכושר היצרנות שלהן מבחינה אגרונומית. המשקל היבש של הנוף ושל מערכת השורשים של זני הדלעת השונים מוצג ב**איור 1**. בכל הזנים שנבחנו לא נמצאו הבדלים מובהקים במשקל הנוף והשורשים בטיפולי השקיה שונים של 10 מק"ג קרבמזפין לליטר לעומת 500 (איור 1). מכאן, שכל הזנים שנבחנו היו עמידים לריכוזי קרבמזפין של עד 500 מק"ג לליטר במי ההשקיה מבחינת הגדילה וההתפתחות. תוצאות דומות התקבלו בעבודתם של Shenker ואחרים^[18], שבחנו את השפעת ריכוז הקרבמזפין בתמיסת מזון

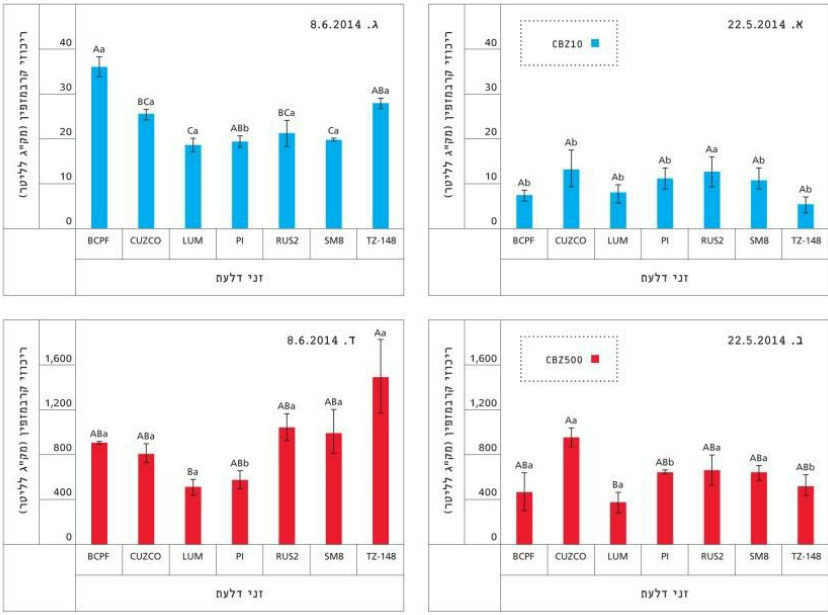
על הגדילה של צמחי מלפפון. בעבודה זו נמצא שמשקלם הטרי של צמחי המלפפון, שגדלו בתמיסות מזון עם ריכוזי קרבמזפין מ-0 ועד 1,000 מק"ג לליטר, לא נבדל באופן מובהק.



מכיוון שמצאנו כי לריכוזי קרבמזפין של עד 500 מק"ג לליטר במי ההשקיה לא הייתה השפעה מובהקת על משקל הנוף והשורשים בכל הזנים שנבחנו, חישבנו את המשקל היבש הממוצע של הנוף והשורש בכל זן מכל שמונת הצמחים שהושקו בשני ריכוזי הקרבמזפין (איור 1). המשקל היבש הממוצע של השורש היה גבוה יותר (7.5 גרם) בזן TZ-148, והנמוך ביותר (2.2 גרם) בזן BCPF (איור 1ב). מערכת שורשים גדולה ומפותחת של כנה מרמזת על פוטנציאל יצרנות ועמידות רבה יותר כנגד עקות ביוטיות (כדוגמת מחלות שוכני קרקע) ואביוטיות (כגון מליחות ורמות גבוהות של זיונים רעילים) [9]. מכאן, שהזן TZ-148 הוא הכנה הפוטנציאלית הטובה ביותר מבין הכנות שנבחנו ליצירת צמחים מורכבים ממשפחת הדלועיים. ואכן, זן זה נמצא כבעל יצרנות גבוהה (איור 1) ועמיד כנגד ריכוזי בורון ונתרן גבוהים במי ההשקיה [11,12] וכנגד מחלות שוכני קרקע [9].

ריכוזי קרבמזפין במי הנקז שהתקבלו בזנים השונים בשני טיפולי ההשקיה, שנקבעו בשלב התחילי והבוגר של הצמח, מובאים באיור 2. אף על פי שכמויות המים בכל השקיה היו זהות בכל הזנים, ריכוזי הקרבמזפין במי הנקז בזנים השונים ובשני מועדי הדגימה היו שונים, וחלק מההבדלים ביניהם היו מובהקים. בהשקיה עם 10 מק"ג קרבמזפין לליטר בשלב התחילי, ריכוזי הקרבמזפין הגבוה ביותר במי הנקז היה בזן CUZCO, והנמוך ביותר בזן TZ-148. הריכוז הממוצע של הקרבמזפין במי הנקז של כל הזנים בשלב זה היה 9.9 מק"ג לליטר (איור 2א), שקרוב לריכוזו במי ההשקיה. לעומת זאת, בהשקיה עם אותו ריכוז קרבמזפין בשלב הבוגר, ריכוזי הקרבמזפין הגבוה ביותר במי הנקז היה בזן BCPF, והנמוך ביותר בזן LUM (איור 2ב). הריכוז הממוצע של הקרבמזפין במי הנקז של כל הזנים בשלב זה היה 24.1 מק"ג לליטר, שגבוה פי 2.4 מריכוזו במי ההשקיה. בהשקיה עם 500 מק"ג קרבמזפין לליטר בשלב התחילי, ריכוזי החומר במי הנקז הגבוה ביותר היה בזן CUZCO והנמוך ביותר בזן LUM. הריכוז הממוצע של הקרבמזפין במי הנקז של כל הזנים בשלב זה היה 609.9 מק"ג לליטר (איור 2ג), שגבוה במעט מריכוזו במי ההשקיה. בהשקיה עם אותו ריכוז קרבמזפין בשלב הבוגר, ריכוזי הקרבמזפין במי הנקז הגבוה ביותר היה בזן TZ-148 והנמוך ביותר בזן LUM. הריכוז הממוצע של הקרבמזפין במי הנקז של כל הזנים בשלב זה היה 928.6 מק"ג לליטר (איור 2ד), שגבוה פי 1.9 מריכוזו במי ההשקיה.

איור 2. ריכוזי קרבמזפין במי הנקז שהתקבלו בזנים השונים בהשקיה במים שהכילו 10 (CBZ10) או 500 (CBZ500) מק"ג קרבמזפין לליטר, ובזמני דגימה שונים - 22.5.2014 (השלב התחילי של הגידול) ו-8.6.2014 (השלב הבוגר של הצמח) הקווים האנכיים בראש העמודות מציינים את ערכי שגיאת התקן. אותיות גדולות שונות בראש העמודות מציינות הבדלים מובהקים ($\alpha = 0.05$) בריכוזי הקרבמזפין במי הנקז בין הזנים השונים בכל תאריך דגימה וריכוז נחון של קרבמזפין במי ההשקיה. אותיות קטנות שונות בראש העמודות מציינות הבדלים מובהקים ($\alpha = 0.05$) בריכוזי הקרבמזפין במי הנקז בין תאריכי הדגימה לכל זן וריכוז קרבמזפין נחונים.



איור 2

ריכוזי קרבמזפין במי הנקז שהתקבלו בזנים השונים בהשקיה במים שהכילו 10 (CBZ10) או 500 (CBZ500) מק"ג קרבמזפין לליטר, ובזמני דגימה שונים - 22.5.2014 (השלב התחילי של הגידול) ו-8.6.2014 (השלב הבוגר של הצמח)

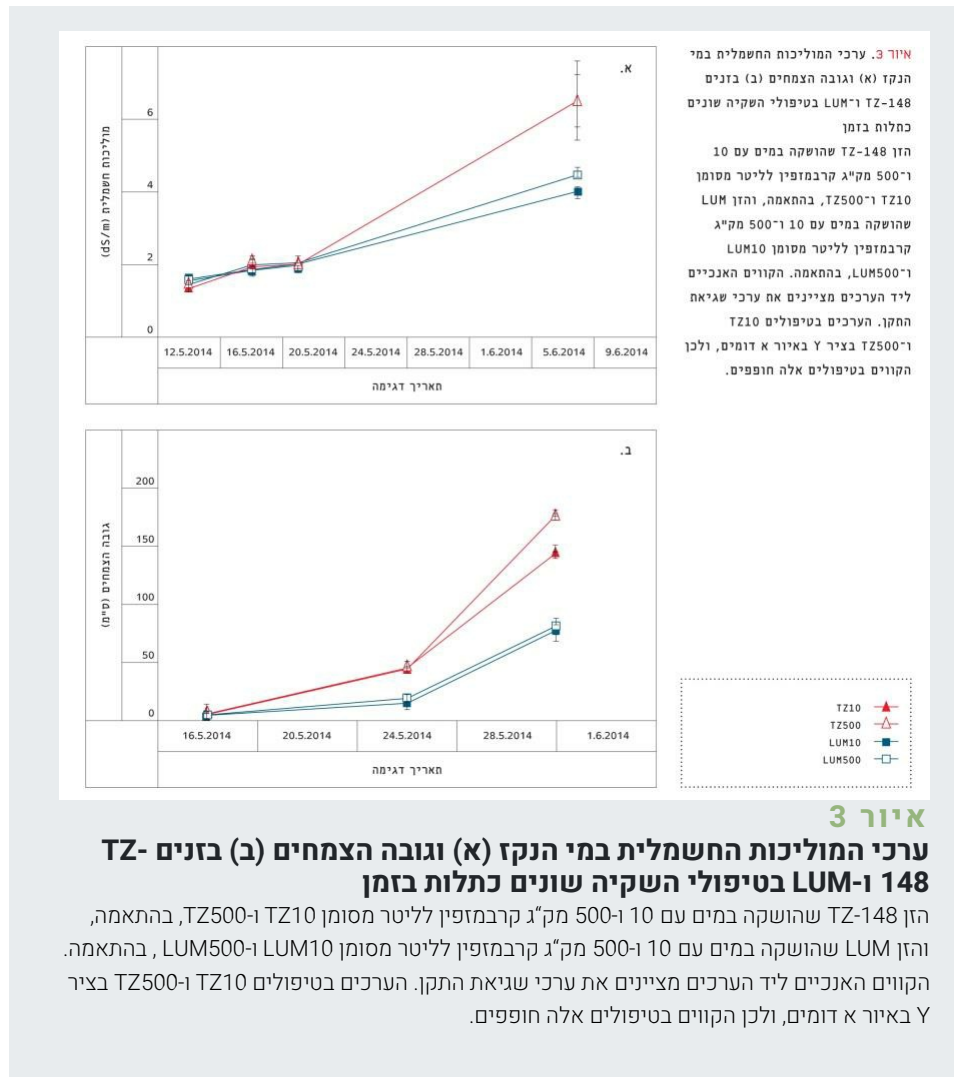
הקווים האנכיים בראש העמודות מציינים את ערכי שגיאת התקן. אותיות גדולות שונות בראש העמודות מציינות הבדלים מובהקים ($\alpha=0.05$) בריכוזי הקרבמזפין במי הנקז בין הזנים השונים בכל תאריך דגימה וריכוז נחון של קרבמזפין במי ההשקיה. אותיות קטנות שונות בראש העמודות מציינות הבדלים מובהקים ($\alpha=0.05$) בריכוזי הקרבמזפין במי הנקז בין תאריכי הדגימה לכל זן וריכוז קרבמזפין נחונים.

מכיוון שמצע הגידול בעציצים היה חומר אינרטי (פרלייט), ריכוזי הקרבמזפין במי הנקז מייצגים באופן טוב את ריכוזי הקרבמזפין בתמיסת בית השורשים. מכאן, שההבדלים בריכוזי הקרבמזפין במי הנקז בזנים השונים (איור 2) יכלו לנבוע בעיקר משני הגורמים הבאים:

- א. הבדל בשיעור קליטת הקרבמזפין בצמחים השונים גרם לשוני בריכוזו בתמיסת בית השורשים. על פי מנגנון זה, ריכוז קרבמזפין נמוך במי הנקז מצביע על שיעור קליטה רב יותר של החומר על-ידי הצמח.
- ב. הבדל בצריכת המים על-ידי הצמחים השונים. לצמחים בגודל שונה (איור 1) קצב דיות שונה, שגורם להבדלים במקדם השטיפה, ומכאן לשינוי בהצטברות הקרבמזפין בתמיסת בית השורשים. במקרה זה, עלייה בריכוזי הקרבמזפין במי הנקז מצביעה על מקדם שטיפה נמוך יותר, שנבע מצריכת מים רבה יותר של הצמח.

כדי לבחון את השינוי בשטיפה של המומסים מבית השורשים בזנים השונים במהלך הגידול, מוצגים ערכי המוליכות החשמלית במי הנקז וגובה הצמח בזנים TZ-148 ו-LUM בשני טיפולי ההשקיה באיור 3, כתלות בזמן הגידול. הזנים TZ-148 ו-LUM נבחרו כדוגמה לזנים שבשלב הבוגר שלהם ריכוזי הקרבמזפין במי הנקז היה גבוה ונמוך, בהתאמה (איור 2). ערכי המוליכות החשמלית במי הנקז בשני הזנים ובשני טיפולי ההשקיה היו נמוכים (פחות מ-2 dS/m) עד ל-21 במאי 2014 (איור 3א). ערכי המוליכות החשמלית במי ההשקיה במהלך כל הניסוי נעו בין 1.5 ל-2.0 dS/m. מכאן ניתן להסיק, שמקדמי השטיפה בשני הזנים עד לתאריך זה היו יעילים בשטיפה ובמניעת הצטברות של מומסים בבית השורשים. לעומת זאת, בתאריך 8.6.2014 חלה עלייה חדה בערכי המוליכות החשמלית במי הנקז ל-6.5 dS/m בזן TZ-148 ול-4.0 dS/m או יותר בזן LUM (איור 3א). העלייה בערכי המוליכות החשמלית בשני הזנים תואמת לעלייה החדה בהתפתחות הצמחים המבוטאת בגובהם בתאריך 1.6.2014: זן TZ-148 הגיע לגובה 145 ו-175 ס"מ וזן LUM ל-81 ו-78 ס"מ (איור 3ב). ניתן להסיק מתוצאות אלה שבשלב הבוגר של הצמחים, שחלה בו עלייה משמעותית בצבירת ביומסה, מקדמי השטיפה היו קטנים יחסית וגרמו לריכוזי הקרבמזפין במי הנקז לעלות. מכאן, שריכוז גבוה של קרבמזפין במי הנקז אין משמעותו

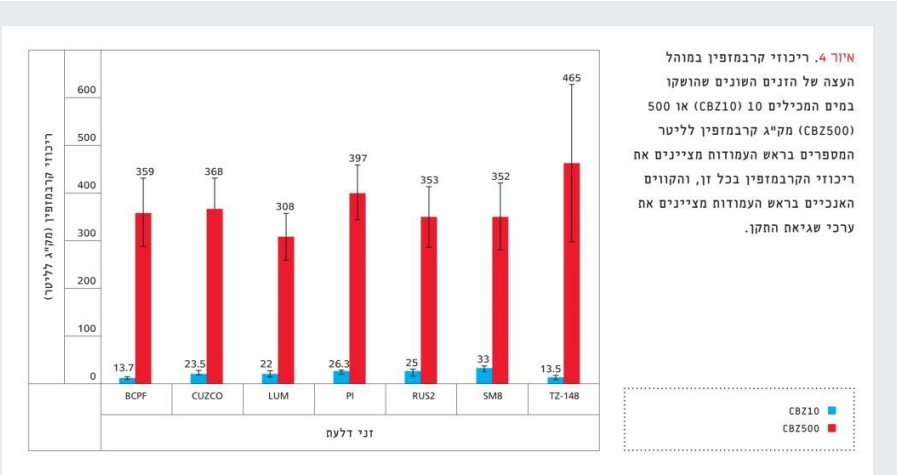
בהכרח קליטה מועטה של קרבמזפין על-ידי הצמחים.



את הקליטה של הקרבמזפין על-ידי השורש ואת תנועתו מהשורש לנוף הצמחים בזנים השונים ניתן לקבוע באמצעות ריכוזו במהול העצה. ריכוז הקרבמזפין במהול העצה היה גבוה באופן מובהק בצמחים שהושקו בריכוז הגבוה של הקרבמזפין (איור 4). ממצא זה מרמז על השפעה רבה של ריכוז הקרבמזפין בתמיסת בית השורשים על ריכוזו במהול העצה. בכל טיפול השקיה של 10 או 500 מק"ג קרבמזפין לליטר, ריכוזי הקרבמזפין במהול העצה נבדלו בזנים השונים, אך לא היו מובהקים סטטיסטית. את מידת היכולת של צמח נתון למנוע קליטה ותנועה של קרבמזפין מתמיסת בית השורשים לנוף (PF) ניתן לחשב על פי [נסחה \[1\] \[9\]](#):

$$PF = C_e / C_s$$

כאשר C_e ו- C_s מייצגים את ריכוז הקרבמזפין (מק"ג לליטר) במהול העצה ובבית השורשים, בהתאמה; כאשר $PF = 1$, יכולת הצמח למנוע קליטה ותנועה של מזהם בו היא מזערית, וככל שערך ה-PF קטן ומתרחק מ-1, יכולת הצמח למנוע קליטה ותנועה של מזהם בו גדלה.

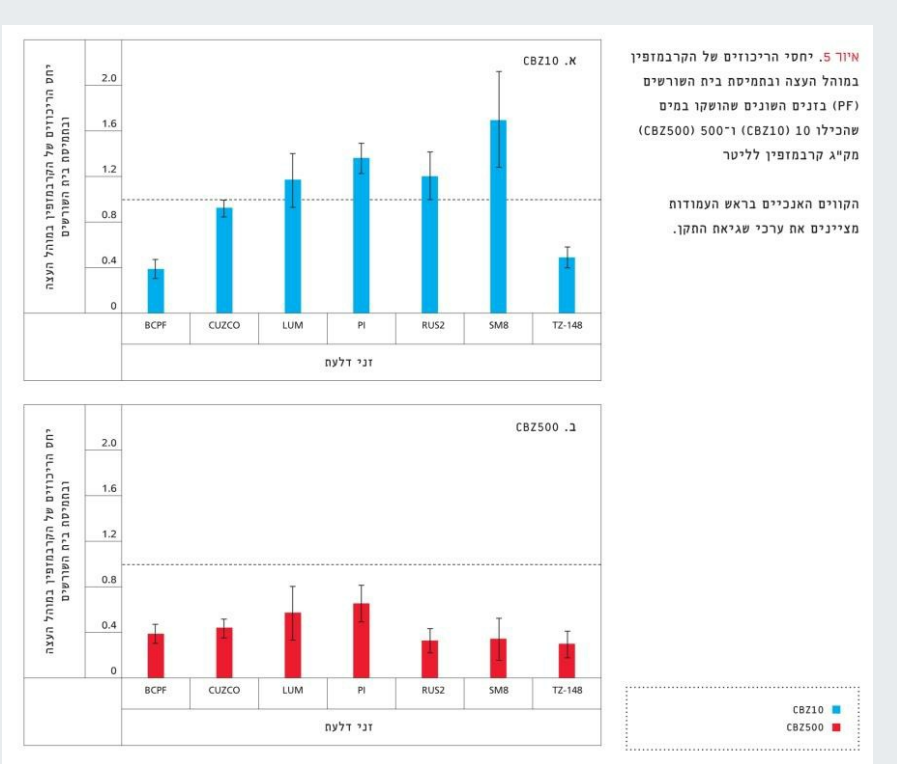


איור 4. ריכוזי קרבמזפין במוהל העצה של הזנים השונים שהושקו במים המכילים 10 (CBZ10) או 500 (CBZ500) מק"ג קרבמזפין לליטר המספרים בראש העמודות מציינים את ריכוזי הקרבמזפין בכל זן, והקווים האנכיים בראש העמודות מציינים את ערכי שגיאת התקן.

איור 4

ריכוזי קרבמזפין במוהל העצה של הזנים השונים שהושקו במים המכילים 10 (CBZ10) או 500 (CBZ500) מק"ג קרבמזפין לליטר המספרים בראש העמודות מציינים את ריכוזי הקרבמזפין בכל זן, והקווים האנכיים בראש העמודות מציינים את ערכי שגיאת התקן.

כפי שנידון מעלה, ניתן להשתמש בריכוזי הקרבמזפין במי הנקז כערך המייצג את ריכוזו בתמיסת בית השורשים. ערכי *PF* שחושבו **מסמחה 1** עבור הזנים השונים בשלב הבוגר שלהם בשני טיפולי ההשקיה מובאים ב**איור 5**. בהשקיה עם 10 מק"ג קרבמזפין לליטר, ערכי *PF* של הזנים SM8 ו-CUZCO, LUM, PI, RUS2, היו קרובים לערך 1. מכאן, שהיכולת של זנים אלה למנוע קליטה ותנועה של קרבמזפין לנוף הצמחים הייתה מוגבלת מאוד בריכוז קרבמזפין נמוך. לעומת זאת, בהשקיה באותם מים, ערכי *PF* בזנים BCPF ו-TZ-148 היו נמוכים מ-0.5 (**איור 5**). מכאן, שמערכות השורשים של זנים אלה עשויות לשמש חסמים ביולוגיים לחדירת קרבמזפין לנוף של צמחים ממשפחת הדלועיים שיורכבו עליהם. בהשקיה עם 500 מק"ג קרבמזפין לליטר, ערכי *PF* של כל הזנים שנבחנו היו נמוכים (פחות מ-0.6), והזנים RUS2 ו-TZ-148 היו בעלי הערכים הנמוכים ביותר (**איור 5**). מכאן, שכל הזנים שנבחנו במחקר הנוכחי הם בעלי יכולת גבוהה לשמש חסמים ביולוגיים ככנות כנגד חדירת קרבמזפין לנוף הצמח, כאשר ריכוזי הקרבמזפין בתמיסת הקרקע גבוה.



איור 5. יחסי הריכוזים של הקרבמזפין במוהל העצה ובתמיסת בית השורשים (*PF*) בזנים השונים שהושקו במים שהכילו 10 (CBZ10) ו-500 (CBZ500) מק"ג קרבמזפין לליטר. הקווים האנכיים בראש העמודות מציינים את ערכי שגיאת התקן.

איור 5

יחסי הריכוזים של הקרבמזפין במוהל העצה ובתמיסת בית השורשים (*PF*) בזנים השונים שהושקו במים שהכילו 10 (CBZ10) ו-500 (CBZ500) מק"ג קרבמזפין לליטר. הקווים האנכיים בראש העמודות מציינים את ערכי שגיאת התקן.

ירידה זו בקליטה ובתנועה של קרבמזפין לנוף הצמח בזנים השונים יכלה לנבוע ממספר גורמים, שניתן לחלקם לשתי קבוצות עיקריות:

- גורמים המשפיעים על קצב קליטת הקרבמזפין לשורש וכניסתו לגליל המרכזי המכיל את צינורות ההובלה: כדי שמוסס, כגון קרבמזפין, הנמצא בתמיסת בית השורשים יגיע לצינורות ההובלה בשורש, הוא חייב לעבור מערכת של תאים שונים, כגון – תאי אפידרמיס, תאי ליבה ותאי אנדודרמיס – כתנועה פנים-תאית (סימפלסט) או חוץ-תאית (אפופלסט) [22]. מכאן, שהבדלים צורניים ופיזיולוגיים בין הזנים השונים יכולים לגרום לקליטה ולתנועה שונה של הקרבמזפין בשורש. לדוגמה, בדפנות תאי האנדודרמיס בשורשי הצמח קיימת שכבת סוברין הידרופובית המכונה פסי-קספרי, המונעת מעבר מומסים בתנועה חוץ-תאית לגליל המרכזי ולצינורות העצה בשורש. כתלות בסוג הצמח, פסי הקספרי יכולים להיות רציפים או להכיל קטעים של אי-רציפות, ומידת אי-רציפות זו קובעת את מידת הבקרה הממברנלית לחדירת של מומסים לגליל המרכזי בשורש.
- גורמים המשפיעים על הובלת המומסים בצינורות העצה מהשורש לנוף: יכולת ההובלה של מזהמים אורגניים הידרופוביים עם זרם הדיות מהשורש לנוף יכולה להיות שונה בין מיני צמחים שונים, וההבדלים בה נובעים מהבדלים פיזיולוגיים בין הצמחים [7] ומקדם החלוקה של המזהמים ההידרופוביים. ייתכן, שתנועת הקרבמזפין עם זרם הדיות בזנים TZ-148 ו-BCPF הייתה אטית יותר לעומת שאר הזנים, בייחוד בטיפול בריכוז הנמוך (10 מק"ג קרבמזפין לליטר).

היכולת הגבוהה יותר של הזנים השונים לשמש חסמים ביולוגיים כנגד חדירת קרבמזפין לנוף הצמח בריכוז גבוה של קרבמזפין (500 מק"ג לליטר) בתמיסת בית השורשים (איור 5) נבעה, כנראה, מעלייה ביעילות של תאי השורש במניעת חדירה של קרבמזפין לעבר צינורות ההובלה בגליל המרכזי של השורש ובהגבלת ההובלה של הקרבמזפין ההידרופובי עם זרם הדיות מהשורש לנוף.

סיכום

בשבעת הזנים שנבחנו בעבודה הנוכחית נעשה שימוש בכנות בצמחים מורכבים ממשפחת הדלועיים, וכולם נמצאו עמידים לריכוז גבוה של קרבמזפין (מעל 500 מק"ג לליטר) במי ההשקיה מבחינת גידול והתפתחות. נמצא כי כאשר קרבמזפין נמצא במי ההשקיה, לזנים TZ-148 ו-BCPF יש יכולת להפחית את הקליטה ואת התנועה שלו לנוף הצמחים בטווח ריכוזים רחב (10-500 מק"ג לליטר). עם זאת, הבימוסה של מערכת השורשים של הזן BCPF הייתה נמוכה, ומרמזת על יצרנות נמוכה של זן זה. מכאן ניתן להסיק, שניתן באופן פוטנציאלי להשתמש בטכנולוגיה של צמחים מורכבים כחסום ביולוגי לחדירת קרבמזפין לנוף הצמחים לאחר בחירה ומיון של כנות מתאימות. המחקר הנוכחי נערך על זנים שונים שיכולים לשמש ככנות, ולא בצמחים המורכבים עצמם. בצמחים מורכבים יכולה להיווצר אינטראקציה בין הכנה לרוכב, שתשנה את הקליטה והתנועה של הקרבמזפין בצמח המורכב. לכן, נדרש מחקר נוסף בצמחים מורכבים כדי לאשש את ההשערה שניתן להפחית את חדירת הקרבמזפין לנצר על-ידי שימוש בצמחים מורכבים.

תודות

אנו מודים לקרן אדליס (Foundation Adelis) על מימון המחקר המוצג במאמר זה ועל תמיכתה בחקלאות ובשמירת הסביבה בישראל.

מקורות

1. אדלשטיין מ, בן-חור מ, פורת א, באומקולר פ ולייב ל. 2007. מניעת חדירת יסודות-מיקרו וגורמי מליחות מזיקים לשרשרת המזון. *מים והשקיה* 486: 18-23.
2. גרוסברגר א, חפץ ב והדר י. 2013. פירוק מיקרוביאלי של חומרים רפואיים בקרקעות לס המושקות בקולחים. *אקולוגיה וסביבה* 4(1): 57-62.

3. גרסטל ז, נאסר א, פיין פ ואחרים. 2014. השפעת תוספת בוצות מטופלות בשטחים חקלאיים על גורל PPCPs בקרקע ובצמח. דו"ח סופי מוגש לקרן המדען הראשי במשרד החקלאות ופיתוח הכפר.
4. מעוז ע, מועלם ת וחפץ ב. 2010. חומרים רפואיים (תרופות) בסביבה: נוכחות בקולחים, תנועה בקרקע וקישור לחומר אורגני מסיס. *אקולוגיה וסביבה* **1**(1): 30-37.
5. Avisar D, Lester Y, and Ronen D. 2009. Sulfamethoxazole contamination of a deep phreatic aquifer. *Science of the Total Environment* **407**: 4278-4282.
 6. Avisar D, Primor O, Gozlan I, and Mamane H. 2010. Sorption of sulfonamides and tetracyclines to montmorillonite clay. *Water, Air, & Soil Pollution* **209**: 439-450.
 7. Briggs GG, Bromilow RH, and Evans AA. 1982. Relationships between lipophilicity and root uptake and translocation of non-ionized chemicals by barley. *Pesticide Science* **13**: 495-504.
 8. Chefetz B, Mualem T, and Ben-Ari J. 2008. Sorption and mobility of pharmaceutical compounds in soil irrigated with reclaimed wastewater. *Chemosphere* **73**: 1335-1343.
 9. Davis AR, Perkins-Veazie P, Sakata Y, et al. 2008. Cucurbit Grafting. *Critical Reviews in Plant Sciences* **27**: 50-74.
 10. Edelstein M and Ben-Hur M. 2012. Use of grafting to mitigate chemical stress in vegetables under arid and semiarid conditions. *Advances in Environmental Research* **20**: 163-179.
 11. Edelstein M, Ben-Hur M, Cohen R, et al. 2005. Boron and salinity effects on grafted and non-grafted melon plants. *Plant and Soil* **269**: 273-284.
 12. Edelstein M, Plaut Z, and Ben-Hur M. 2011. Sodium and chloride exclusion and retention by non-grafted and grafted melon and Cucurbita plants. *Journal of Experimental Botany* **62**: 177-184.
 13. Ernst M, Hein A, Asmin J, et al. 2012. Water quality analysis: Detection, fate, and behaviour, of selected trace organic pollutants at managed aquifer recharge sites. In: *Water Reclamation Technologies for Safe Managed Aquifer Recharge*. pp. 197-224.
 14. Heberer T, Reddersen K, and Mechlinski A. 2002. From municipal sewage to drinking water: Fate and removal of pharmaceutical residues in the aquatic environment in urban areas. *Water Science and Technology* **46**: 81-88.
 15. Kolpin DW, Furlong ET, Meyer MT, et al. 2002. Pharmaceuticals, hormones, and other organic wastewater contaminants in U.S. streams, 1999-2000: A national reconnaissance. *Environmental Science and Technology* **36**: 1202-1211.
 16. Lertratanakoon K and Horning MG. 1982. Metabolism of carbamazepine. *Drug Metabolism and Disposition* **10**: 1-10.
 17. Miao XS, Yang JJ, and Metcalfe CD. 2005. Carbamazepine and its metabolites in wastewater and in biosolids in municipal wastewater treatment plant. *Environmental Science and Technology* **39**: 7469-7475.
 18. Shenker M, Harush D, Ben-Ari J, and Chefetz B. 2011. Uptake of carbamazepine by cucumber plants – A case study related to irrigation with reclaimed wastewater. *Chemosphere* **82**: 905-910.
 19. Shone MG and Wood AV. 1974. A comparison of the uptake and translocation of some organic herbicides and a systemic fungicide by barley. *Journal of Experimental*

Botany **25**: 390-400.

20. Ternes TA. 1998. Occurrence of drugs in german swage treatment plants and rivers. *Water Research* **32**: 3245-3260.
21. Tixier C, Singer HP, Oellers S, and Muller SR. 2003. Occurrence and fate of carbamazepine, clofibric acid, diclofenac, ibuprofen, ketoprofen, and naproxen in sueface waters. *Environmental Science and Technology* **37**: 1061-1068.
22. Winker M, Clemens J, Reich M, et al. 2010. Ryegrass uptake of carbamazepine and ibuprofen applied by urine fertilization. *Science of the Total Environment* **408**: 1902–1908.
23. Zhang Y, Geiben SU, and Gal C. 2008. Carbamazepine and diclofenc: Removal in wastewater treatment plants and occurrence in water bodies. *Chemosphere* **73**: 1151-1161.